

## Badania przepływów materii i energii w krajobrazie miejskim

### Matter and energy flow analysis (MEFA) in urban landscape

Andrzej Macias

Uniwersytet im. A. Mickiewicza  
Instytut Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego  
Zakład Kształtowania Środowiska Przyrodniczego i Fotointerpretacji  
ul. Dziegiełowa 27, 61-680 Poznań, Polska, e-mail: macias@amu.edu.pl

**Abstract.** Among the methods of classification of urban landscapes are matter-energy studies. They have developed over the last thirty years. Matter and energy flows and their modes of transmission are an important issue because they greatly determine a city's spatial development, its character, and its spatial structure. A survey of the available literature shows that research usually focuses on the city's inputs and outputs (the so-called "black box" method), with no detailed analysis of all flows and transformations of matter and energy within the city (the so-called mereological method). This follows primarily from the lack of most of the data indispensable for such an analysis and from a high degree of complication of this type of research.

The present study consists of two parts. The first gives an overview of the matter-energy research into urban landscapes carried out to date. The other presents this research in the context of sustainable development on the example of the city of Poznań for the years 1995 and 2004. Also in this case the "black box" method was employed. An analysis of the results showed that while the structure of man-made flows of matter and energy had undergone a fundamental quantitative change between the two periods, the proportions of the individual streams had remained practically the same. What did change was Poznań's impact on the natural environment, which had decreased radically. Also, the use of energy had been optimised, as a result of which there was a reduction in the emission of pollutants. The effect was an improvement in the condition of the city's entire natural environment.

An insight into the structure of matter and energy flows in urban landscapes greatly enhances the programming of targets and tasks serving sustainable development, and offers the possibility of modifying streams of matter and energy with a view to their optimisation.

**Słowa kluczowe:** przepływ materii i energii, metabolizm miasta, rozwój zrównoważony

**Key words:** matter and energy flow, urban metabolism, sustainable development

### Wstęp

Jedną z metod badań krajobrazu miejskiego są analizy przepływów materii i energii, rozwijane na przestrzeni ostatnich trzydziestu lat. Niestety, w ogromnej większości przypadków traktują one miasto jako całość (tzw. metoda holistyczna, zwana też popularnie metodą „black box”), nie odnosząc się do poszczególnych miejskich jednostek krajobrazowych (tzw. metoda mereologiczna). Wynika to przede wszystkim z braku większości danych niezbędnych do takiej analizy oraz wysokiego stopnia skomplikowania takich badań. Jest to bardzo ważny problem, bowiem przepływy materii i energii w dużym stopniu decydują o rozwoju przestrzennym i charakterze miasta, a także strukturze przestrzennej miasta.

W niniejszym artykule podsumowano też dotychczasowy stan badań materialno-energetycznych nad krajobrazami miejskimi. Badania te idą w wielu kierunkach i obejmują:

1. Badania nad przepływami materii i energii pod różnym kątem i na różnych poziomach (pierwiastkowym, wyższym):

- przepływ materii – *Material Flow Analysis* (MFA),
- przepływ energii – *Energy Flow Analysis* (EFA),
- przepływ materii i energii - *Material and Energy Flow Analysis* (MEFA).

2. Bilansowanie metabolizmu miasta, zarówno antropogenicznego (zwanego też kulturowym), jak i naturalno-antropogenicznego.

3. Badania nad siecią przepływów materii i energii.

4. Modelowanie badań na przepływami materii i energii.

Opracowanie i analiza oraz bilansowanie przepływów materii i energii jest zadaniem bardzo czasochłonnym i skomplikowanym. Dlatego częściej powstają teoretyczne modele. Wady i zalety badań materialno-energetycznych ukazuje tabela 1. Wspomniane wcześniej dwa podstawowe podejścia badawcze do tego problemu, tj. holistyczne i mereologiczne, ukazano także w formie modelowej (ryc. 1 i 2), a ich wady i zalety ukazuje tabela 2. Dodatkowo można wyróżnić model pośredni (ryc. 3), łączący cechy obu podejść.

W literaturze można znaleźć szereg przykładów obliczeń przepływów materii i energii w miastach. Dotyczą one najczęściej podejścia holistycznego (ryc. 1), rzadziej pośredniego (ryc. 3) między modelem holistycznym a mereologicznym. Natomiast dotąd nie znalazł praktycznego zastosowania w miastach model mereologiczny.

Poniżej przedstawiono listę wybranych przykładów analizy przepływów materii i energii w miastach:

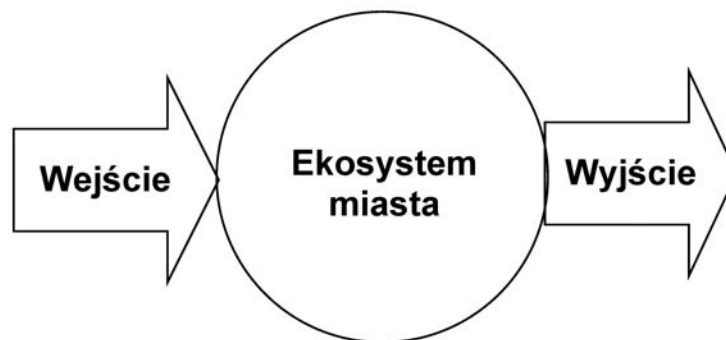
- Bruksela: Duvigneaud, Denayer-De Smet (1977),
- Stuttgart: Kreeb, Schneider (1977),
- Praga: Stanners, Bourdeau (1995),
- Górzno, Toruń: Nienartowicz (1996),
- Poznań: Macias, Mizgajski (1998),
- Sydney: Newman (1999),
- Londyn: Beatley (2000),
- Zduny, Odolanów, Baszków, Ostroróg, Skoki: Macias (2001),
- Toronto: Sahely, Dudding, Kennedy (2003),
- Taipei: Shu-Li Huang, Wan-Lin Hsu (2003).

Tabela 1. Badania materialno-energetyczne w krajobrazie miejskim

Table 1. Material – energetical research in urban landscape – advantages and disadvantages

Zalety	Wady
<ul style="list-style-type: none"> <li>- możliwość zbilansowania i porównywania różnych form materii i energii;</li> <li>- możliwość przeprowadzenia analizy porównawczej dla różnych typów krajobrazów;</li> <li>- możliwość kompleksowego opisu funkcjonowania krajobrazu miejskiego;</li> <li>- możliwość oceny stopnia homeostazy, efektywności funkcjonowania oraz alternatywnych rozwiązań i optymalizowania działań ludzkich;</li> <li>- możliwość modelowania i prognozowania przepływów materii i energii w krajobrazie;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- duży stopień skomplikowania;</li> <li>- duża trudność w zbieraniu materiałów, brak części danych (szczególnie tych o mniejszym znaczeniu);</li> <li>- duża trudność odwzorowania rzeczywistych współzależności między antroposferą a środowiskiem przyrodniczym;</li> <li>- nie wszystkie elementy przepływów można przedstawić za pomocą równoważników energetycznych (np. woda, kruszywa) i jednostek wagowych (energia elektryczna);</li> <li>- brak możliwości szczegółowego przedstawienia przestrzennego rozkładu nakładów materii i energii;</li> </ul>

Zródło: oprac. własne



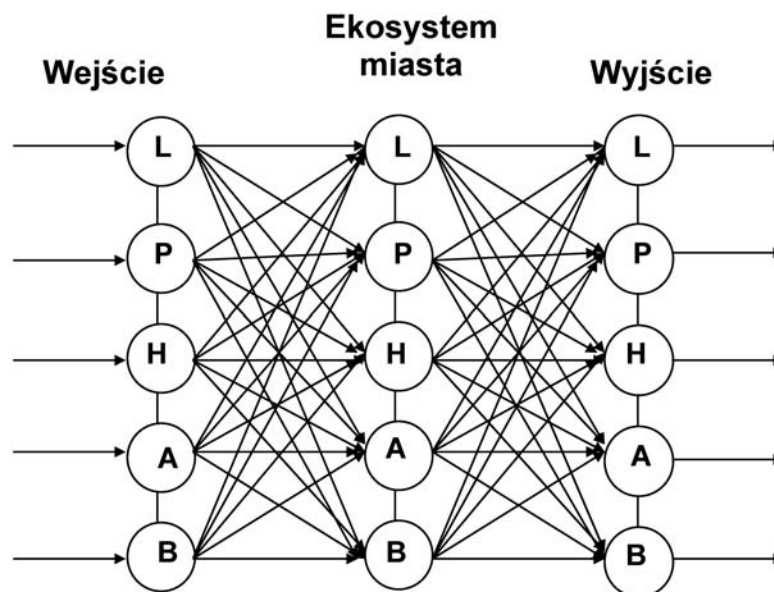
Ryc. 1. Model holistyczny (tzw. „black box”) przepływów materii i energii w ekosystemie miasta  
 Fig. 1. Holistic model (a so-called “black box”) of matter and energy flows in an urban ecosystem

Tabela 2. Porównanie podejścia holistycznego i mereologicznego w badaniach materialno-energetycznych w krajobrazie miejskim

Table 2. The comparizon of holistic and mereological approaches in material – energetical research in urban landscape

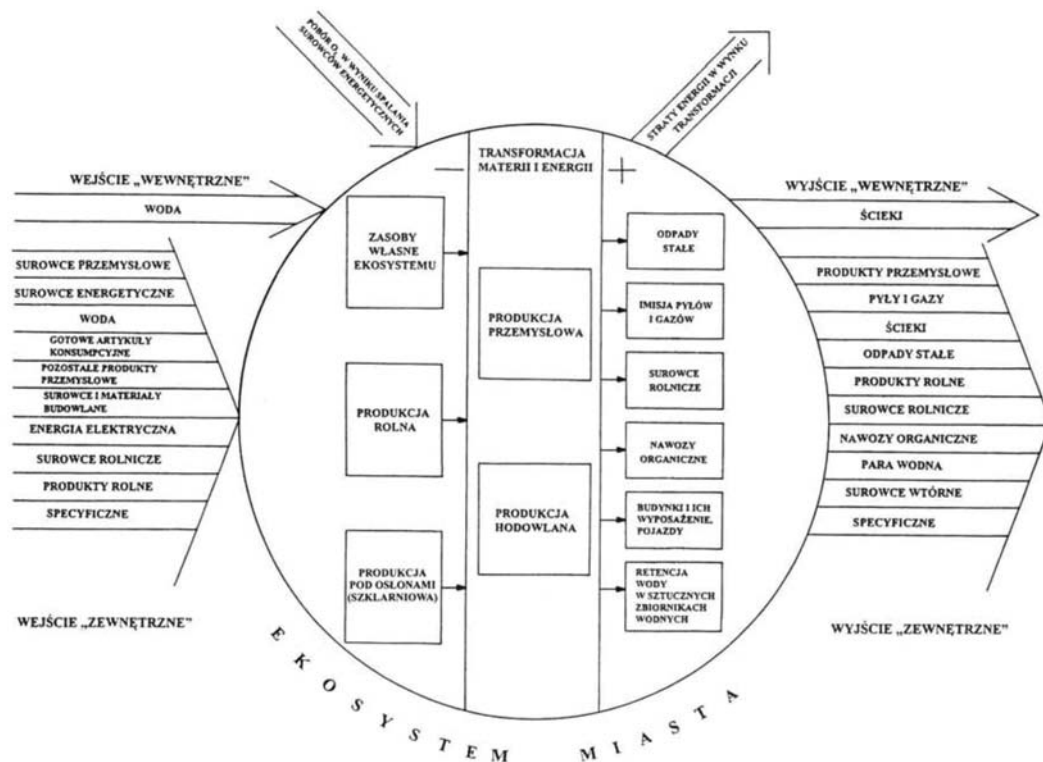
Podejście holistyczne	Podejście mereologiczne
- możliwość analizy materii i energii tylko na wejściu i wyjściu ekosystemu miasta; - brak analizy transformacji materii i energii oraz ich przepływów wewnątrz ekosystemu miasta; - metoda wskazana do analizy wielofunkcyjnych systemów przestrzennych; - metoda niedostatecznie precyzyjna, ale stosunkowa łatwa do zastosowania;	- możliwość kompleksowej analizy przepływów i transformacji materii i energii w obrębie całego ekosystemu miasta; - olbrzymia ilość szczegółowych danych do zebrania i bardzo skomplikowany sposób i przedstawienia; - metoda wskazana do analizy małych ekosystemów; - metoda precyzyjna, ale bardzo trudna do zastosowania i sprawiająca szereg trudności;

Zródło: oprac. własne



Ryc. 2. Uproszczony, schematyczny model mereologiczny przepływów materii i energii w ekosystemie miasta (oprac. na podst. Kikuchi M., et al., „A mathematical model of interactions...., 2003)

Fig. 2. Simplified, schematic merological model of matter and energy flows in an urban ecosystem (prepared on the basis of Kikuchi M. et al. „A mathematical model of interactions...., 2003)



Ryc. 3. Model pośredni przepływów materii i energii w ekosystemie miasta (Macias 2001)

Fig. 3. Intermediate model of matter and energy flows in an urban ecosystem (Macias 2001)

## Badania materialno-energetyczne w krajobrazie miejskim w kontekście rozwoju zrównoważonego

Analizy przepływów materii i energii stanowią doskonałe narzędzie do badań nad zrównoważonym rozwojem miast. Za pomocą jednostek wagowych i energetycznych można dążyć do określenia optymalnego stanu ekosystemu miejskiego, który jest przecież tworem sztucznym, istniejącym dzięki zasilaniu go przez człowieka materia i energią. Właśnie pomiar materii i energii może pełnić rolę uniwersalnego miernika do badań różnego typu krajobrazów, nie tylko miejskich, które stanowiły w tym przypadku ilustrację rozważanego problemu. Znajomość struktury przepływów materii i energii w mieście stanowi istotną przesłankę do programowania celów i zadań służących rozwojowi zrównoważonemu oraz daje możliwość modyfikacji strumieni materii i energii pod kątem ich optymalizacji.

## Realizacja rozwoju zrównoważonego w mieście Poznaniu – analiza porównawcza dla lat 1995 i 2004

### Założenia metodologiczne i metodyczne

W 1998 roku ukazała się praca A. Maciasa i A. Mizgajskiego prezentująca metabolizm Poznania w ujęciu systemowym. Ekosystem tego miasta potraktowano jako tzw. „czarną skrzynkę” (tzw. podejście holistyczne), tj. brano pod uwagę tylko strumienie wejściowe i wyjściowe, natomiast nie zajmowano się transformacją materii i energii wewnątrz ekosystemu miejskiego. W 2004 roku w ten sam sposób obliczono obecną strukturę przepływów

materii i energii. Nie mniej jednak napotkano na szereg trudności dotyczących przede wszystkim braku informacji związanych z metabolizmem Poznania (szczególnie odnośnie małych zakładów przemysłowych). Jednak z punktu widzenia ogólnego bilansu stanowią one znikomy ułamek procenta i praktycznie ich brak nie ma większego wpływu na rozważany problem, bowiem także w tym ujęciu należy zwrócić uwagę na istotną prawidłowość, która podnosi wiarygodność tych analiz: im dany parametr odgrywa istotniejszą rolę w bilansie, tym precyzyjniejsze są dane o nim (Macias, Mizgajski 1998).

W 1995 roku Poznań dopiero wkraczał na drogę zrównoważonego rozwoju. Obecnie rozwiązania prawne i różne programy związane z ochroną środowiska przyrodniczego (m.in. „Program Ochrony Środowiska”, „Plan Gospodarki Odpadami”, „Zielony Poznań przyjaznego środowiska”) wymuszają rozwiązania związane ze zmniejszeniem wpływu antropopresji na środowisko. Porównanie metabolizmu materii i energii Poznania z 1995 i 2004 roku pozwala na ocenę, stopnia realizacji zasad i praw rządzących rozwojem zrównoważonym.

W tabelach 3 i 4 przedstawiono wejścia i wyjścia dla ekosystemu miasta Poznania w roku 1995, a w tabelach 5 i 6 w roku 2004. Dla lepszego zobrazowania podano nie tylko jednostki wagowe i ekwiwalent energetyczny, ale także ich udział procentowy. Dane zbierane i obliczane były w ten sam sposób, aby w jak największym stopniu zmniejszyć wielkość błędu.

Tabela 3. Wejścia do ekosystemu miasta Poznania za 1995 rok

Table 3. Entries to the ecosystem of Poznań city in 1995

Nazwa strumienia	Waga		Ekwiwalent energetyczny	
	t	%	MJ	%
Gotowe urządzenia i produkty	22.147,1	0,03	25.619.222,0	0,03
Gotowa żywność	188.426,1	0,27	2.008.537.858,0	2,45
Surowce energetyczne	2.201.451,4	3,14	70.045.225.677,0	85,52
w tym:	1.948.451,3	2,78	56.748.506.877,0	69,29
- surowce energetyczne bez gazu ziemnego	253.000,1	0,36	13.296.718.800,0	16,23
- gaz ziemny				
Energia elektryczna	-	0,00	3.475.317.600,0	4,24
Woda	64.835.575,3	92,41	-	0,00
Surowce przemysłowe	590.680,0	0,84	5.864.587.073,1	7,16
Surowce i materiały budowlane	2.306.887,1	3,29	-	0,00
Surowce rolnicze	16.879,4	0,02	486.340.849,0	0,60
Razem	70.162.046,4	100	81.905.628.279,1	100

Zródło: Macias, Mizgajski (1998)

Tabela 4. Wyjścia z ekosystemu miasta Poznania za 1995 rok

Table 4 Exits from the ecosystem of Poznań city in 1995

Nazwa strumienia	Waga		Ekwiwalent energetyczny	
	t	%	MJ	%
Produkty przemysłowe	571.785,7	0,80	3.921.823.801,0	55,63
Zanieczyszczenia pyłowe i gazowe	5.472.102,5	7,67	1.128.051.210,0	16,00
Odpady stałe	424.267,1	0,60	1.056.952.951,5	14,99
Ścieki	63.579.576,3	89,15	778.981.822,4	11,05
Odzysk surowców wtórnych	46.033,0	0,06	164.633.130,0	2,33
Para wodna	1.225.000,0	1,72	0,0	0,00
Razem	71.318.765,4	100	7.050.442.914,9	100

Zródło: Macias, Mizgajski (1998)

Tabela 5. Wejścia do ekosystemu miasta Poznania za 2004  
Table 5. Entries to the ecosystem of Poznań city in 2004

Nazwa strumienia	Waga		Ekwiwalent energetyczny	
	t	%	MJ	%
Gotowe urządzenia i produkty	46.622,8	0,10	151.340.897,6	0,28
Gotowa żywność	260.763,6	0,56	2.151.003.541,3	3,99
Surowce energetyczne	1.263.635,8	2,71	36.228.782.297,4	67,15
w tym:				
- surowce energetyczne bez gazu ziemnego	1.137.312,0		26.680.562.960,0	
- gaz ziemny	126.323,8		6.616.486.937,4	
Energia elektryczna	-	0,00	7.208.419.320,0	13,36
Woda	41.891.620,0	89,68	-	0,00
Surowce przemysłowe	930.941,1	2,00	8.051.418.844,5	14,92
Surowce i materiały budowlane	2.309.214,0	4,94	-	0,00
Surowce rolnicze	5.934,5	0,01	164.168.500,0	0,30
Razem	46.708.731,8	100	53.955.133.400,8	100

Zródło: oprac. własne

Tabela 6. Wyjścia z ekosystemu miasta Poznania za 2004  
Table 6. Exits from the ecosystem of Poznań city in 2004

Nazwa strumienia	Waga		Ekwiwalent energetyczny	
	t	%	MJ	%
Produkty przemysłowe	791.497,9	1,83	2.522.071.386,4	52,69
Zanieczyszczenia pyłowe i gazowe	2.168.082,6	5,03	546.735.146,0	11,42
Odpady stałe	585.715,2	1,36	1.281.639.898,3	26,78
Ścieki	38.608.276,8	89,54	82.233.829,9	1,72
Odzysk surowców wtórnych	56.157,0	0,13	353.754.516,0	7,39
Para wodna	910.000,0	2,11	0,0	0,00
Razem	43.119.729,5	100	4.786.433.776,6	100

Zródło: oprac. własne

## Omówienie wyników i wnioski

Wielkość i struktura strumieni materii i energii na wejściu i wyjściu ekosystemu miejskiego odzwierciedla charakter metabolizmu miasta i pozwala ocenić oddziaływanie Poznania na środowisko przyrodnicze.

1. W obu okresach nadal dominuje pod względem wagowym gospodarka wodno-ściekowa, jednak znacznemu zmniejszeniu uległa wielkość tego strumienia, tj. dla wody o 35% i ścieków o 39%. Jednocześnie w związku z ukończeniem budowy i właściwą eksploatacją Centralnej Oczyszczalni Ścieków zdecydowanie uległa redukcji ilość energii wprowadzana do wód powierzchniowych (aż o 89%).

2. Struktura surowców nie uległa zmianie, dalej dominują paliwa stałe. Wielkość wszystkich grup paliw uległa zmniejszeniu (w sumie pod względem wagowym o 43%, a pod względem energetycznym o 48%). Związane to jest ze znacznymi kosztami ich zakupu, docieplaniem budynków oraz modernizacją kotłowni zakładowych i elektrociepłowni. Z uwagi na ceny gazu ziemnego nie tylko nie zwiększył się jego udział, ale spadło jego zużycie do ogrzewania mieszkań. Efektem spalania paliw są zanieczyszczenia powietrza i odpady. W związku z tym znacznej redukcji uległa ilość wprowadzanych do powietrza pyłów i gazów. Jest to spowodowane, oprócz mniejszej ilości spalanych paliw, także szerszym zastosowaniem i coraz skuteczniejszym działaniem urządzeń odpylających i redukujących gazy wylotowe. Pod względem wagowym strumień ten zmniejszył się o 60%, a pod względem energetycznym o 51%. Zmniejszyła się też ilość emitowanej do powietrza pary wodnej (o 26%).

3. Zwiększeniu (o 107%) uległa ilość dostarczanej do Poznania energii elektrycznej (głównie z zespołu elektrowni Pątnów-Adamów-Konin oraz elektrowni „Dolna Odra”). Jest to pozytywny trend, bowiem dzięki temu nie trzeba spalać w mieście dodatkowych ilości paliw, z czym wiąże się emisja zanieczyszczeń powietrza oraz powstające po spaleniu odpady stałe (istniejące elektrociepłownie Karolin i Garbary pokrywają tylko ok. 20% zapotrzebowania na energię elektryczną dla Poznania).

4. Metabolizm przemysłowy Poznania uległ zwiększeniu pod względem wagowym zarówno na wejściu (o 101%), jak i na wyjściu z ekosystemu (o 38%). Co ciekawe, o ile zwiększył się ekwiwalent energetyczny surowców dla przemysłu (o 37%), to zmniejszeniu uległa wartość energetyczna produktów przemysłowych opuszczających ten ekosystem (o 36%).

5. W związku z coraz lepszą sytuacją materialną mieszkańców Poznania zwiększeniu uległy strumienie związane z metabolizmem mieszkańców. Niestety, w tym przypadku wiąże się to ze zwiększeniem ilości odpadów komunalnych wytwarzanych w gospodarstwach domowych. I tak, zakupiono gotowej żywności więcej pod względem wagowym o 38% i energetycznym o 7%, a gotowych urządzeń i produktów odpowiednio o 111% i aż o 490%. Ilość usuwanych z Poznania odpadów zwiększyła się pod względem wagowym o 38% i pod względem energetycznym o 21%. Cieszyć może zwiększona utylizacja odpadów przemysłowych oraz odzysk komunalnych surowców wtórnych (wagowo o 22% i energetycznie o 115%).

6. Nie uległa zmianie wielkość metabolizmu budowlanego Poznania. Dalej jest spory udział tradycyjnej technologii opartej o kruszywa, cement cegły i pustaki. W porównywanych okresach udział ich pod względem wagowym jest taki sam, jednak ilość oddanych do użytku mieszkań zwiększyła się o 80%, a ich powierzchnia o 130%. Tak więc nastąpił spadek materiałochłonności budownictwa w analizowanym okresie.

7. Coraz większemu zmarginalizowaniu w granicach administracyjnych Poznania ulega rolnictwo. Zmniejsza się powierzchnia użytków rolnych (w porównywanym okresie o 490 ha), jak i zwiększa się udział gruntów odlogowanych i ugorowanych (stanowią one obecnie około 30% gruntów ornych) oraz ilość zwierząt hodowlanych (o ponad 50%). Pod względem wagowym zapotrzebowanie na surowce rolnicze zmalało o 65%, a pod względem energetycznym o 66%.

Struktura antropogenicznych przepływów materii i energii w porównywanych okresach uległa zasadniczym zmianom ilościowym, natomiast sam udział procentowy poszczególnych strumieni pozostał prawie niezmienny. Zdecydowanie zmniejszył się wpływ Poznania na środowisko przyrodnicze. Optymalizacji uległo też wykorzystanie energii, w efekcie czego nastąpił spadek emisji zanieczyszczeń. Wynikiem tego jest poprawa stanu środowiska przyrodniczego tego miasta. Zdecydowanie zmniejszyła się też ilość energii cieplnej rozpraszanej w środowisku (jedną z najważniejszych form metabolizmu miasta jest przekształcanie różnych form energii w energię ciepłą, która później emitowana jest do środowiska). Kolejnym krokiem poprawiającym sytuację byłoby wprowadzenie systemu zarządzania środowiskiem opartego o normy ISO 14.000 i EMAS II.

## Literatura

- Beatley T., 2000. *Green Urbanism. Learning from European Cities*. Island Press. Washington.
- Duvigneaud P., Denayer-De Smet S., 1977. *L'ecosysteme urbs. L'ecosysteme urbain Bruxellois*. [In:] Duvigneaud P., Kestemont P. (ed.). „Productivité biologique en Belgique”, SCOPE Travaux de la Section belge du Programme Biologique International. Editions Duculot. Paris-Gembloux.
- Kreeb K.H., Schneider K., 1977. *Energetische Ökogramme von anthropogenen Ökosystemen*. [In:] Unger K. (ed.). *Biophysikalische Analyse pflanzlicher Systeme*. VEB Gustav Fischer Verlag. Jena.
- Macias A., Mizgajski A., 1998. *Metabolizm Poznania w kategoriach ekologii miasta*. [W:] *Podstawy gospodarczej polityki miasta. Studium Poznania*. Biuletyn PAN KPZK, z. 181. Wyd. Nauk. PWN. Warszawa. 89 – 116.
- Macias A., 2001. *Antropogeniczny przepływ materii i energii na przykładzie wybranych małych miast Wielkopolski*. *Poznańskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk. Prace Komisji Geograficzno-Geologicznej*, t. 31. Poznań.
- Newman P.W.G., 1999. *Sustainability and cities: extending the metabolism model*. *Landscape and Urban Planning*, 44. 219-226.



*Macias A.*

- Nienartowicz A., 1996. Energetyka dużych systemów ekologicznych. Wyd. Uniwersytetu Mikołaja Kopernika. Toruń.
- Sahely H.R., Dudding., Kennedy Ch.A., 2003. Estimating the urban metabolism of Canadian cities: Greater Toronto Area case study. *Canadian Journal Of Civil Engineering* 30. 468-483.
- Shu-Li Huang, Wan-Lin Hsu, 2003. Materials flow analysis and emergy evaluation of Taipei's urban construction. *Landscape and Urban Planning* 63. 61-74.
- Stanners D., Bourdeau P. (eds.), 1995. Europe's Environment. The Dobris Assessment. European Environment Agency. Copenhagen.